

网络出版时间:2021-10-11 09:23 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2022.04.008
网络出版地址:<https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20211009.1416.018.html>

菌根对盐胁迫下胡杨幼苗生长和叶绿素 荧光特性的影响

再努尔·吐尔逊,高文礼,陈晓楠,伊力努尔·艾力,马晓东

(新疆师范大学 生命科学学院 新疆特殊环境物种保护与调控生物学实验室/
干旱区植物逆境生物学重点实验室,新疆 乌鲁木齐 830054)

[摘要] 【目的】研究盐胁迫下丛枝菌根真菌(arbuscular mycorrhizal fungi, AMF)对胡杨(*Populus euphratica*)实生幼苗生长和叶绿素荧光特性的影响,为促进塔里木河下游胡杨繁殖更新提供依据。【方法】以1年生胡杨实生幼苗为材料,设置0.2 g/kg(对照,CK)、3 g/kg(S1)、6 g/kg(S2)和12 g/kg(S3)4个NaCl处理水平,每个NaCl水平下设接种AMF和不接种AMF进行对比,采用盆栽控制试验研究接种AMF对盐胁迫下胡杨幼苗根系菌根侵染率、菌根依存度、幼苗生长、叶绿素荧光参数和叶绿素含量的影响。【结果】1)随着盐胁迫的加剧,胡杨幼苗根系菌根侵染率显著降低,菌根依存度在S2和S3处理下与CK差异显著,表明盐胁迫在一定程度上抑制了AMF对胡杨幼苗根系的侵染。2)盐胁迫的加剧导致胡杨幼苗株高相对增长率、基径相对增长率、总根长、细根长、根表面积和生物量降低,但同水平盐胁迫下接种AMF能提高幼苗的上述指标,其中S1处理下的根系表面积和S2处理下的根冠比在接种AMF与未接种AMF间差异达到显著水平,说明接种AMF对盐胁迫下胡杨幼苗的生长具有促进作用。3)盐胁迫导致最大光化学效率(F_v/F_m)、PSⅡ潜在光化学效率(F_v/F_0)和光化学淬灭系数(qP)较CK下降,但是接种AMF能提高盐胁迫下叶绿素荧光指标,其中 F_v/F_m 、 F_v/F_0 、 qP 在S2和S3处理下显著高于不接种AMF组;幼苗叶片叶绿素含量在S3处理下接种AMF组显著高于不接种AMF组,且较CK增加了18.3%,表明接种AMF能减轻盐胁迫对胡杨幼苗光系统的损伤,也可提高叶片叶绿素含量。【结论】接种AMF能提高胡杨幼苗对盐胁迫的抗性,有助于胡杨幼苗快速度过生长脆弱期。

[关键词] 丛枝菌根真菌;胡杨;盐胁迫;幼苗生长;叶绿素荧光参数

[中图分类号] Q945.11

[文献标志码] A

[文章编号] 1671-9387(2022)04-0058-08

Effects of arbuscular mycorrhizal symbiosis on growth and chlorophyll fluorescence characteristics of *Populus euphratica* seedlings under salt stress

Zainur TUERXUN, GAO Wenli, CHEN Xiaonan, Yilinuer AILI, MA Xiaodong

(Xinjiang Key Laboratory of Special Species Conservation and Regulatory Biology/Key Laboratory of Plant Stress Biology in Arid Land, College of Life Science, Xinjiang Normal University, Urumqi, Xinjiang 830054, China)

Abstract: 【Objective】The effects of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) on chlorophyll fluorescence characteristics and growth of *Populus euphratica* seedlings under salt stress were studied to provide basis for promoting reproduction and regeneration of *P. euphratica* in the lower reaches of the Tarim River.

【Method】One-year-old *P. euphratica* seedlings were tested with four NaCl treatment levels of 0.2 g/kg

[收稿日期] 2021-04-19

[基金项目] 国家自然科学基金项目(42067067);新疆自然科学基金项目(2020D01A74)

[作者简介] 再努尔·吐尔逊(1994—),女(维吾尔族),新疆阿图什人,在读硕士,主要从事干旱区植物生理生态研究。

E-mail:1906579483@qq.com

[通信作者] 马晓东(1977—)男,新疆乌鲁木齐人,教授,主要从事干旱区植物生理生态研究。E-mail:mxd1107@126.com

(control, CK), 3 g/kg (S1), 6 g/kg (S2), and 12 g/kg (S3). For each NaCl level, the groups with and without AMF inoculation were compared. The effects of AMF inoculation on root mycorrhizal infection rate, mycorrhizal dependence, seedling growth, chlorophyll fluorescence parameters and chlorophyll content were analyzed.【Result】1) With the intensification of salt stress, the root infection rate of *Populus euphratica* seedlings decreased considerably. The mycorrhizal dependence in S2 and S3 treatments was significantly different from the CK group, suggesting that salt stress inhibited root infection of AMF. 2) In seedlings not inoculated, intensification of salt stress led to decreases in relative growth rates of plant height and basal diameter, total root length, fine root length, root surface area, and biomass. AMF inoculation improved these indexes at the same level of salt stress. There were substantial differences in root surface area of S1 treatment and root shoot ratio of S2 treatment in comparison with uninoculated samples. It indicates that AMF promoted the growth of *P. euphratica* seedlings under salt stress. 3) The maximum photochemical efficiency (F_v/F_m), PSII potential photochemical efficiency (F_v/F_0), and photochemical quenching coefficient (qP) decreased under salt stress. AMF inoculation improved the chlorophyll fluorescence indexes as the values of F_v/F_m , F_v/F_0 and qP under S2 and S3 treatments were significantly higher than those in the samples without AMF inoculation. The chlorophyll content of seedlings in the S3 treatment was significantly higher than in the uninoculated group and increased by 18.3% compared with the control group. This indicates that AMF inoculation reduced the damage to the photosystem of *P. euphratica* seedlings under salt stress and increased the chlorophyll content of leaves.【Conclusion】AMF inoculation improved the resistance of *Populus euphratica* seedlings to salt stress and helped the seedlings pass through the fragile growth period.

Key words: arbuscular mycorrhizal fungi; *Populus euphratica*; salt stress; seedling growth; chlorophyll fluorescence parameters

塔里木河下游干旱少雨,蒸发强烈,土壤含盐量较高,且在河水漫溢的影响下盐分空间分布复杂,植物生长受盐旱胁迫严重^[1]。过多的盐分常常导致荒漠河岸林植物的正常生长受限,地表植被群落出现退化,严重地区甚至还会有大面积植物死亡^[2]。杨柳科(Salicaceae)杨属(*Populus*)胡杨(*Populus euphratica*),具有较强的抗逆能力,能在极端干旱、盐化严重等较恶劣的环境下生存,对防治沙漠化和绿洲生态安全保护具有重要作用^[3],是塔里木河下游荒漠河岸林的建群种^[4]。塔里木河下游的胡杨对整个荒漠河岸林群落的稳定和维系起到关键作用,然而由于盐胁迫不利于胡杨幼苗生长,导致胡杨实生苗更新困难,种群存在较大的退化风险。因此,研究盐胁迫下胡杨幼苗的生长特性及抗逆能力具有重要意义。

丛枝菌根真菌(arbuscular mycorrhizal fungi, AMF)能与94%的维管植物形成菌根,菌根通过菌丝网络帮助植物获取土壤中的营养和水分,增加植物对周围土壤的利用范围,替代了植物吸收根的部分功能^[5]。研究表明,AMF在根系中的定殖受到土壤水分、盐分、碳、氮和有机质等土壤特性的强烈影

响^[6-8]。在塔里木河下游,胡杨既是荒漠河岸林建群种,又是关键的菌根植物。研究表明,胡杨根际土壤中的AMF孢子种类以摩西球囊霉(*Glomus mosseae*)占优势,AMF在胡杨根际的侵染率最高可达81%、侵染强度达45%以上,但土壤中胡杨根际的AMF多样性较低,可能是恶劣的荒漠环境降低了AMF的多样性和接种潜力^[9]。AMF也被看作是不同生态系统中植物耐盐性的生物改良剂^[10],在抗盐胁迫中可改变宿主植物的组织结构、提高渗透调节能力、改善氧化损伤和维持正常的光合过程,体现了AMF在植物抗盐胁迫中的重要作用^[11]。叶绿素荧光参数是研究光合作用机理的天然探针^[12],它可指示植物在不同条件下耐受环境胁迫的能力和光合机构受损害的程度^[13],还能够探测光合机构捕获光能和传递电子的关键信息,且对环境变化特别敏感,因此可以用来监测物种对生物和非生物胁迫的抗性^[14-16]。目前,有关AMF是否能通过增强胡杨幼苗的耐盐性来促进幼苗生长,进而使之快速渡过脆弱期尚不清楚,因此本研究探讨了盐胁迫下AMF对胡杨实生幼苗生长及叶绿素荧光参数的影响,以为促进塔里木河下游胡杨繁殖更新提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料及处理

选取株型基本一致的 1 年生胡杨实生幼苗为试验材料(胡杨更新过程中实生幼苗阶段是关键),栽培至直径 30 cm、高 30 cm 的圆形花盆中,每盆定苗 1 株。供试砂土取自塔里木河下游河道两侧,田间最大持水量为 22%,平均全盐含量 1.8 g/kg, pH 8.4。砂土过孔径 0.2 cm 筛去除杂质后清洗,并在 110 °C、0.14 MPa 下连续湿热灭菌 1 h 备用。供试菌种为质量比 1:1 的幼球囊霉(*Glomus etunicatum*)和摩西球囊霉(*Funneliformis mosseae*)的混合菌种,来源于新疆农业科学院微生物研究所,菌剂孢子密度为 25 mL⁻¹。花盆放置于玻璃温室接受自然光照,待培养 40 d 后,对幼苗进行盐胁迫处理。

塔里木河下游土壤中含盐量一般为 0.2 g/kg,因此本试验设 0.2 g/kg(CK)、3 g/kg(S1)、6 g/kg(S2) 和 12 g/kg(S3) 4 个 NaCl 水平,每个 NaCl 水平下又设置接种 AMF 和不接种 AMF(对照)处理,共计 8 个处理,每个处理 3 株幼苗(3 个重复),随机排列。土壤含水量为田间最大持水量的 80%,土壤盐分采用便携式电导率仪(DDSJ-308F)测定。为避免盐激,采用少量多次的浇灌方式来控制,每天 1 次,连续添加 7 d,直至达到预定的 NaCl 水平。随后对胡杨幼苗盐胁迫处理 90 d,期间为防止盐分流失,每个花盆下面放一个托盘,把花盆里渗出来的水再倒回去。处理 90 d 后,从胡杨的根、茎和叶中取样,样品在 105 °C 烘箱中杀青 30 min,然后置于 80 °C 烘箱中干燥至质量恒定。

1.2 测定指标与方法

1.2.1 根系 AMF 侵染率和依存度 幼苗收获后,对其根样进行染色处理(台盼蓝染色法)^[17],用于镜检。选取直径 2 mm 左右的细根剪成 1 cm 长度制成封片于显微镜下观测,检测幼苗根系内菌根侵染状况和菌根共生结构,采用网格交叉法统计形成菌根的根段数,计算根系的 AMF 侵染率^[18]。菌根依存度按同一盐胁迫处理下的接种植株干质量和不接种植株干质量来计算,具体计算公式如下:

$$\text{菌根侵染率} = \frac{\text{侵染根段数}}{\text{全部根段数}} \times 100\%;$$

$$\text{菌根依存度} = (\text{接种植株干质量} -$$

$$\text{不接种植株干质量}) / \text{接种植株干质量} \times 100\%.$$

1.2.2 幼苗生长指标 试验开始前分别测量各处理幼苗的株高和基径,盐胁迫处理 90 d 后测量各处理幼苗的株高、基径及地上和地下生物量(烘干称质

量法)。挖掘过程中,采用过筛法将植株根系全部取出,并对不同处理植株根系进行分级,其中粗根直径 ≥ 2 mm,细根直径为 ≥ 0.5 mm ~ < 2 mm。用根系扫描仪(Epson V 700)将不同处理的植物根系扫描成电子图像后,应用 WinRHIZO 软件对植株根系形态的总根长、细根长和根表面积进行分析,每个处理重复测定 6 次,其他相关指标按以下公式计算:

$$\text{株高相对增长率} = (\text{植物最终高度} - \text{植物最初高度}) / \text{植物最初高度} \times 100\%;$$

$$\text{基径相对增长率} = (\text{植物最终基径} - \text{植物最初基径}) / \text{植物最初基径} \times 100\%;$$

$$\text{根冠比} = \text{地下部分生物量} / \text{地上部分生物量}.$$

1.2.3 叶绿素含量和荧光参数 盐胁迫 90 d 后,使用叶绿素仪测定各处理幼苗叶片的叶绿素含量,每个处理重复测定 6 次。同时在阳光充足的天气下,选择幼苗从上向下数第 4 和第 5 片充分生长的叶片,采用 Junior-PAM 便携式调制叶绿素荧光仪于 09:00—18:00,每隔 3 h 测定光适应下最大荧光 F_{m'};并于当日 22:30 测量暗适应的初始荧光 F₀、光下基础荧光 F 和最大荧光 F_m;同时计算可变荧光 F_v、非光化学过程处于最优化时的荧光产量 F_{v'}、PS II 潜在光化学效率 F_v/F₀、最大光化学效率 F_v/F_m、非光化学淬灭系数 NPQ 和光化学淬灭系数 qP 等^[19],计算公式如下:

$$F_v = F_m - F_0;$$

$$F_v' = 1 / (1 / F_0 - 1 / F_m + 1 / F_{m'});$$

$$F_v / F_0 = (F_m - F_0) / F_0;$$

$$F_v / F_m = (F_m - F_0) / F_m;$$

$$NPQ = (F_m - F_{m'}) / F_{m'};$$

$$qP = (F_{m'} - F) / (F_{m'} - F_0).$$

1.3 数据统计分析

采用 Microsoft Excel 绘图,采用 SPSS 19.0 统计软件计算各指标平均值和标准误,并对数据进行多因素方差分析和 LSD 多重比较分析,差异显著性水平为 P < 0.05。

2 结果与分析

2.1 盐胁迫对胡杨幼苗菌根侵染的影响

由表 1 可知,随着盐胁迫程度的增加,胡杨幼苗菌根侵染率呈现逐渐降低的变化趋势,且各处理间差异显著(P < 0.05);与对照(CK)相比,S1、S2 和 S3 处理胡杨幼苗菌根侵染率分别降低了 9.3%、15.6% 和 43.7%,这说明盐胁迫抑制了胡杨菌根的形成。

表 1 盐胁迫对胡杨幼苗菌根侵染率和菌根依存度的影响

Table 1 Effects of salt stress on mycorrhizal infection and mycorrhizal dependence of *Populus euphratica* seedlings

盐胁迫处理 Salt stress treatment	菌根侵染率/% Mycorrhizal infection rate	菌根依存度/% Mycorrhizal dependency
CK	79.9±0.31 a	23.3±1.53 a
S1	72.5±0.15 b	25.0±1.00 a
S2	67.6±0.21 c	17.0±1.73 b
S3	45.1±0.12 d	3.0±2.00 c

注:同列数据后标不同小写字母表示处理间差异达显著水平($P<0.05$),下同。

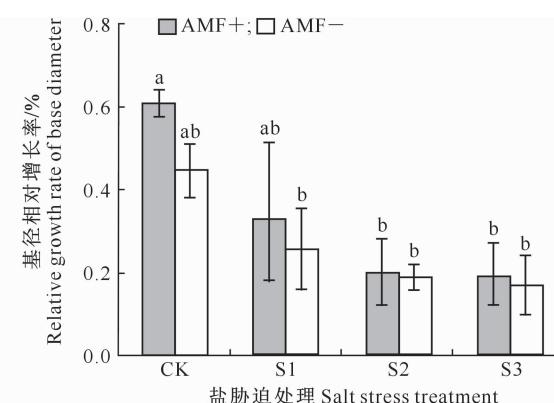
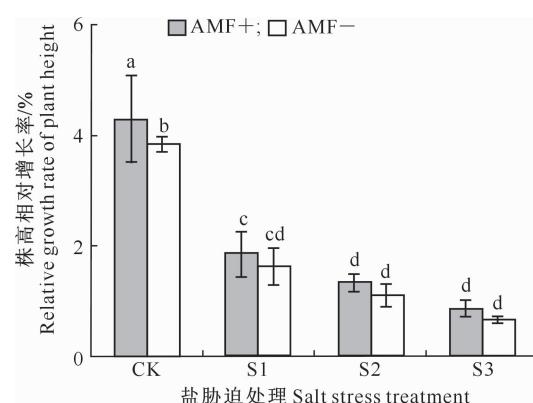
Note: Different lowercase letters indicate significant difference between treatments ($P<0.05$). The same below.

菌根依存度反映了 AMF 与植物生物量增加之间的关系,表 1 显示,随着盐胁迫程度的增强,菌根依存度呈现先增加后减小的趋势,S2 和 S3 盐胁迫处理下菌根依存度较 CK 分别降低了 27% 和 87%,

达显著水平($P<0.05$),说明盐胁迫达到一定程度会抑制菌根对胡杨幼苗干物质积累的作用。

2.2 AMF 对盐胁迫下胡杨幼苗地上部分生长的影响

由图 1 可见,随着盐胁迫程度的增强,接种 AMF 和不接种 AMF 的胡杨幼苗株高相对增长率和基径相对增长率均呈现逐渐下降的趋势;无论是否接种 AMF,盐胁迫下各组胡杨幼苗的株高相对增长率均显著低于 CK,而基径相对增长率仅接种 AMF 的 S2 和 S3 处理与其 CK 差异显著($P<0.05$)。另外,在相同盐胁迫水平下,株高和基径相对增长率在接种 AMF 与不接种 AMF 组之间无显著差异,但总体上接种组的指标值略高于不接种组,说明接种 AMF 有利于胡杨幼苗的生长。



AMF+ 和 AMF- 分别表示接种 AMF 和不接种 AMF;图柱上标不同小写字母表示处理间差异达显著水平($P<0.05$)。图 2 同 AMF+ and AMF- denote inoculated and uninoculated AMF, respectively. Different lowercase letters indicate significant difference ($P<0.05$). The same in Fig. 2

图 1 AMF 对盐胁迫下胡杨幼苗株高和基径相对增长率的影响

Fig. 1 Effect of AMF on relative growth rate of height and basal diameter of *Populus euphratica* seedlings under different salt treatments

2.3 AMF 对盐胁迫下胡杨幼苗根系生长和总生物量的影响

由表 2 可知,随着盐胁迫的加重,接种和不接种 AMF 处理胡杨幼苗的总根长、细根长和根表面积均逐渐降低。接种与不接种 AMF 比较,胡杨幼苗总根长和细根长仅在 2 个 CK 组之间差异显著($P<0.05$),而在不同盐胁迫处理组间差异均不显著。根表面积仅在 2 个 S1 处理间差异显著($P<0.05$),而其他盐胁迫水平和 CK 处理间差异均不显著。由此可知,盐胁迫下胡杨幼苗的总根长、细根长和根表面积均降低,但接种 AMF 可在一定程度上促进植株根系的生长。

由表 2 还可知,无论是否接种 AMF,胡杨幼苗的总生物量均随着盐胁迫的加剧而降低,各盐胁迫组幼苗的总生物量均较其 CK 显著下降,其中 S3 处理下不接种 AMF 幼苗的总生物量比 CK 降低了 90%,接种 AMF 组幼苗的总生物量比 CK 降低了 72.4%。根冠比在 S1、S2 和 S3 处理下接种 AMF 组比不接种组分别增加了 20.9%、38.4% 和 27.8%,并在 S2 处理下接种与不接种 AMF 组之间差异显著($P<0.05$)。由此可见,盐胁迫下接种 AMF 可不同程度提高幼苗的总生物量,同时促进生物量的合理分配。

表 2 AMF 对盐胁迫下胡杨幼苗根系生长和总生物量的影响

Table 2 Effects of AMF on root growth and total biomass of *Populus euphratica* seedlings under different salt treatments

处理 Treatment	总根长/cm Total root length	细根长/cm Fine root length	根表面积/cm ² Root surface area	根冠比 Root shoot ratio	总生物量/(g·株 ⁻¹) Total biomass
AMF-CK	1 811±86.60 b	1 082±23.97 b	1 027±98.23 a	0.768±0.138 bc	23.79±3.65 ab
AMF-S1	786±191.30 cd	577±172.23 cd	342±67.93 c	0.718±0.113 c	12.85±4.01 cd
AMF-S2	565±17.52 d	274±17.03 de	175±53.78 cd	0.776±0.141 bc	7.60±1.24 def
AMF-S3	142±21.48 e	93±7.22 e	77±12.82 d	0.781±0.135 bc	2.39±0.45 f
AMF+CK	2 053±71.59 a	1 372±65.81 a	1 237±56.76 a	0.893±0.080 bc	27.15±2.32 a
AMF+S1	1 044±134.61 c	771±39.04 c	657±164.49 b	0.914±0.061 bc	17.87±0.64 bc
AMF+S2	691±59.55 d	439±153.78 d	296±9.79 cd	1.254±0.165 a	12.82±0.67 cde
AMF+S3	265±41.87 e	190±62.05 e	118±14.54 d	1.089±0.868 ab	7.48±0.21 ef

注:AMF+ 和 AMF- 分别表示接种 AMF 和不接种 AMF, 表 3 同。

Note: AMF+ and AMF- denote inoculated and uninoculated AMF, respectively. The same in Table 3.

2.4 AMF 对盐胁迫下胡杨幼苗叶片叶绿素荧光参数和叶绿素含量的影响

由表 3 可知, 盐胁迫下胡杨幼苗的 F_v 值在各处理之间无显著差异, 但接种 AMF 后 F_v 值均大于对应的不接种 AMF 处理。随着盐胁迫水平的升高, 接种 AMF 和不接种 AMF 胡杨幼苗叶片 F_v/F_m 、 F_v/F_0 均具有先下降后增加的趋势; 在 S2 和 S3 处理下, 接种 AMF 组胡杨幼苗叶片的 F_v/F_m 、 F_v/F_0 、

qP 显著高于不接种 AMF 组 ($P<0.05$), 其中 F_v/F_m 较不接种 AMF 组增加 14.3% 和 4.8%, F_v/F_0 增加 50.1% 和 40.7%, qP 增加 41.2% 和 43.5%。在接种 AMF 和不接种 AMF 的情况下, NPQ 均随盐胁迫加重呈先增加后下降的变化趋势。综上可知, 接种 AMF 能有效缓解盐胁迫对胡杨幼苗叶片光合能力的损伤。

表 3 AMF 对盐胁迫下胡杨幼苗叶片叶绿素荧光参数的影响

Table 3 Effects of AMF on chlorophyll fluorescence parameters of *Populus euphratica* seedlings under different salt treatments

处理 Treatment	初始荧光(F_0) Initial fluorescence	最大光化学效率 (F_v/F_m) Maximal photochemical efficiency	PS II 潜在光化学效率 (F_v/F_0) Potential photochemical efficiency of PS II	非光化学淬灭系数(NPQ) Nonphotochemical quenching	光化学淬灭系数(qP) Photochemical quenching coefficient
AMF-CK	301±26.62 a	0.848±0.028 a	6.196±1.590 a	1.154±0.076 bc	0.627±0.006 a
AMF-S1	277±21.62 a	0.836±0.003 a	5.140±0.110 a	1.690±0.520 b	0.622±0.039 a
AMF-S2	281±14.51 a	0.723±0.013 c	2.623±0.170 c	2.320±0.920 a	0.395±0.087 b
AMF-S3	274±23.00 a	0.792±0.007 b	3.811±0.160 b	2.242±0.320 a	0.376±0.078 b
AMF+CK	335±25.85 a	0.864±0.013 a	6.522±0.750 a	1.353±0.120 b	0.640±0.016 a
AMF+S1	288±26.92 a	0.840±0.002 a	5.246±0.0570 a	1.893±0.190 c	0.576±0.028 a
AMF+S2	287±25.22 a	0.841±0.006 a	5.335±0.250 a	3.521±0.530 a	0.675±0.130 a
AMF+S3	298±36.45 a	0.842±0.029 a	5.869±1.470 a	3.050±0.360 a	0.687±0.120 a

AMF 对盐胁迫下胡杨幼苗叶片叶绿素含量的影响如图 2 所示。由图 2 可知, 在 S1、S2 和 S3 处理下, 不接种 AMF 组胡杨幼苗叶片的叶绿素含量较 CK 处理分别减少 9.9%, 5.1% 和 10%, 而接种 AMF 组则较 CK 分别增加 0.1%, 11.3% 和 22.5%。在 S1 处理下, 接种 AMF 与不接种 AMF 组胡杨幼苗叶片的叶绿素含量无显著差异, 但在 S2 和 S3 处理下, 接种 AMF 组胡杨幼苗叶片的叶绿素含量分别较不接种 AMF 组高 4.8% 和 17.9%, 且在 S3 处理下二者差异显著 ($P<0.05$)。这表明盐胁迫达到一定程度后, 接种 AMF 能增加胡杨幼苗叶片的叶绿素含量。

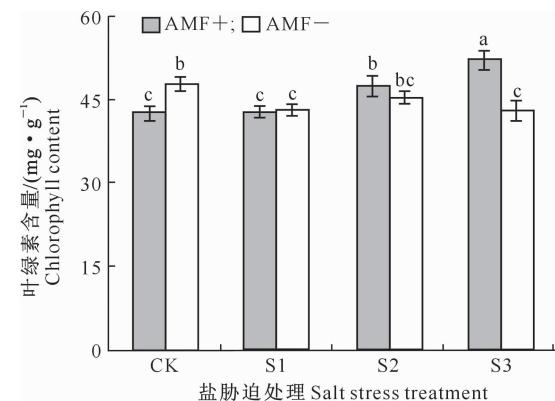


图 2 AMF 对盐胁迫下胡杨幼苗叶片叶绿素含量的影响

Fig. 2 Effect of AMF on chlorophyll content of *Populus euphratica* seedlings under salt stress

3 讨 论

本研究发现,盐胁迫对菌根形成产生了抑制作用。从菌根依存度来看,低盐胁迫下(S1),AMF的依存度显著高于中(S2)、高(S3)盐胁迫,并高于对照(CK),这说明低盐胁迫不但没有抑制反而促进了菌根依存度。韩冰等^[20]研究显示,低盐胁迫下黄瓜植株接菌处理的菌根依存度高于正常接菌处理,这与本试验结果一致。塔里木河下游胡杨幼苗在河水漫溢下有一段时期处于低盐环境,如果此时AMF能迅速侵染,将对幼苗生长十分有利。

盐胁迫使植物生长受阻,严重情况下甚至导致死亡,接种AMF则有助于提高植物的耐盐能力^[21]。本研究中,盐胁迫处理下,不接种AMF组胡杨幼苗的株高相对增长率、基径相对增长率、总生物量、总根长、细根长和根表面积均较对照显著降低,而接种AMF后上述指标均有所提升,这与张欣磊等^[22]对盐胁迫处理下白芨(*Bletilla striata*)的研究结果一致。盐胁迫下接种AMF对地下根系生长具有促进作用,这有助于提高胡杨幼苗对土壤水分和养分的获取能力,从而进一步增强其抗盐旱胁迫能力,以适应塔里木河下游极端干旱和高盐的不良环境。

叶绿素荧光能反映植物光能吸收、激发能传递、光化学反应、电子传递等几乎所有光合作用过程的变化,其参数可表征植物对外部生物和非生物胁迫的抗性,以及植物对不同生境的适应能力^[23]。研究表明, F_v/F_m 是衡量光抑制程度的重要指标,可用于指示PSII初级光能的转换效率^[24],如果 F_v/F_m 大大降低,则表明植物受到光抑制,反应中心受到不可逆的损伤或可逆的失活^[25]。在本研究中,盐胁迫导致 F_v/F_m 、 F_v/F_0 和 qP 下降,但接种AMF使中盐胁迫(S2)和高盐胁迫(S3)下胡杨幼苗的上述指标较不接种AMF组的显著提高。由此可知,盐胁迫越严重,接种AMF对胡杨幼苗叶片叶绿素荧光参数的影响越明显。在S2和S3处理下,接种AMF组胡杨幼苗的叶绿素荧光指标均高于不接种AMF组,说明接种AMF对于提高盐胁迫下胡杨幼苗的光合能力及保护光合机构具有一定的作用。同时,植物叶片的叶绿素含量容易受到盐胁迫的影响,而AMF则可以提高植物的光合效率和叶绿素含量^[26]。在本研究中,盐胁迫导致不接种AMF组胡杨幼苗的叶绿素含量较对照减少,但在S2和S3处理下,接种AMF后胡杨幼苗叶片的叶绿素含量均高于不接种AMF组,这与高崇^[27]对杜梨(*Pyrus*

betulifolia Bunge)、杨海霞等^[28]对白三叶(*Trifolium repens* L.)、王栋等^[29]对紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)的研究结论一致,这说明盐胁迫下AMF对植物幼苗叶绿素含量的提高有促进作用。塔里木河下游高盐土壤环境对植物光合物质的积累十分不利,而接种AMF能有效保障胡杨幼苗正常的光合作用过程,提高其耐盐性,从而促进幼苗快速生长,帮助其及早度过生长脆弱期。

4 结 论

1)胡杨幼苗的菌根侵染率与生长基质中的盐含量密切相关,随着盐含量的增加,胡杨幼苗根系菌根侵染率显著下降。此外,盐胁迫会抑制菌根对胡杨幼苗干物质积累的作用。

2)在相同盐胁迫程度下,与未接种AMF相比,接种AMF组胡杨幼苗的总生物量、株高相对增长率、基径相对增长率、总根长和细根长总体上变化不显著;但低盐胁迫(3 g/kg NaCl)处理下胡杨幼苗的根表面积、中盐胁迫(6 g/kg NaCl)处理下胡杨幼苗的根冠比均为接种AMF组显著高于不接种AMF组,表明盐胁迫下AMF对胡杨幼苗生长起到保护作用。

3)中盐胁迫(6 g/kg NaCl)和高盐胁迫(12 g/kg NaCl)处理下,接种AMF使胡杨幼苗的叶绿素荧光参数(F_v/F_m 、 F_v/F_0 、 qP)值显著高于不接种AMF的幼苗,且高盐胁迫(12 g/kg NaCl)处理下接种AMF可显著($P<0.05$)增加胡杨幼苗叶片的叶绿素含量,说明接种AMF能减轻盐胁迫对胡杨幼苗光系统的损伤。

[参考文献]

- [1] 张瑞群,马晓东,吕豪豪.多枝柽柳幼苗生长及其根系解剖结构对水盐胁迫的响应[J].草业科学,2016,33(6):1164-1173.
Zhang R Q, Ma X D, Lü H H. Response of growth and anatomical structure of roots of *Tamarix ramosissima* seedlings to salinity and water stress [J]. Pratacultural Science, 2016, 33(6): 1164-1173.
- [2] Pollastrini S, Savvides A, Pesando M, et al. Impact of two arbuscular mycorrhizal fungi on *Arundo donax* L. response to salt stress [J]. Planta, 2018, 247(3):573-585.
- [3] 夏振华,陈亚宁,朱成刚,等.干旱胁迫环境下的胡杨叶片气孔变化[J].干旱区研究,2018,35(5):1111-1117.
Xia Z H, Chen Y N, Zhu C G, et al. Stomatal change in leaves of *Populus euphratica* under drought stress [J]. Arid Zone Research, 2018, 35(5):1111-1117.
- [4] 王海珍,韩路,徐雅丽,等.干旱胁迫下胡杨光合光响应过程

- 模拟与模型比较 [J]. 生态学报, 2017, 37(7): 2315-2324.
- Wang H Z, Han L, Xu Y L, et al. Simulated photosynthetic responses of *Populus euphratica* during drought stress using light response models [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(7): 2315-2324.
- [5] 郭晗铃, 刘世俊, 徐 静, 等. 丛枝菌根真菌对双子叶植物生长和根系特征的影响: 整合分析 [J]. 生态学杂志, 2017, 36(7): 1855-1864.
- Guo H L, Liu S J, Xü J, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on growth and root traits of dicotyledons plants: a meta-analysis [J]. Chinese Journal of Ecology, 2017, 36(7): 1855-1864.
- [6] Jia T T, Wang J, Chang W, et al. Proteomics analysis of *E. angustifolia* seedlings inoculated with arbuscular mycorrhizal fungi under salt stress [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2019, 20(3): 788-812.
- [7] Jing P, Cuihua H, Jun L, et al. Effects of salt stress on plant and the mechanism of arbuscular mycorrhizal fungi enhancing salt tolerance of plants [J]. Advances in Earth Science, 2018, 33(4): 361-372.
- [8] Soti P G, Toprak B, Rosa N D L, et al. Influence of land use intensity and management on arbuscular mycorrhizal fungi-avocado symbiosis [J]. Journal of Agricultural Science, 2021, 13(3): 10-16.
- [9] Yang Y, Chen Y, Cai B, et al. The arbuscular mycorrhizal symbiotic status of *Populus euphratica*, a drought resistant tree species from arid lands [J]. Ecohydrology, 2013, 6(6): 1001-1008.
- [10] Chang Q, Guo W, Pan L, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on the growth and uptake of La and Pb by maize grown in La and Pb-contaminated soil [J]. Environmental Science, 2017, 38(9): 3915-3926.
- [11] Motaleb N A A, Elhady S A A, Ghoname A A. AMF and *Bacillus megaterium* neutralize the harmful effects of salt stress on bean plants [J]. Springer Nature, 2020, 72(1): 29-39.
- [12] 岑海燕, 姚洁妮, 翁海勇, 等. 叶绿素荧光技术在植物表型分析的研究进展 [J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(12): 3773-3779.
- Cen H Y, Yao J N, Weng H Y, et al. Applications of chlorophyll fluorescence in plant phenotyping: a review [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2018, 38(12): 3773-3779.
- [13] Zhang Y J, Gao H, Li Y H, et al. Effect of water stress on photosynthesis, chlorophyll fluorescence parameters and water use efficiency of common reed in the Hexi corridor [J]. Russian Journal of Plant Physiology, 2019, 66(4): 556-563.
- [14] 陈亚鹏, 陈亚宁, 徐长春, 等. 塔里木河下游地下水埋深对胡杨气体交换和叶绿素荧光的影响 [J]. 生态学报, 2011, 31(2): 344-353.
- Chen Y P, Chen Y N, Xu C C, et al. Effects of groundwater depth on the gas exchange and chlorophyll fluorescence of *Populus euphratica* in the lower reaches of Tarim River [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(2): 344-353.
- [15] 张 华, 包玉英, 特布沁. 盐胁迫下接种丛枝菌根真菌(AMF)对小叶锦鸡儿的生长及总黄酮含量的影响 [J]. 微生物前沿, 2013, 2(3): 71-77.
- Zhang H, Bao Y Y, Te B Q. Effect of arbuscular mycorrhizal fungi on growth and the total flavonoids of *Caragana microphylla* Lam under salt stress [J]. Advances in Microbiology, 2013, 2(3): 71-77.
- [16] Kavroulakis N, Tsiknia M, Ipsilonantis I, et al. Arbuscular mycorrhizal fungus inocula from coastal sand dunes arrest olive cutting growth under salinity stress [J]. Mycorrhiza, 2020, 30(2): 475-489.
- [17] 盛萍萍, 刘润进, 李 敏. 丛枝菌根观察与侵染率测定方法的比较 [J]. 菌物学报, 2011, 30(4): 519-525.
- Sheng P P, Liu R J, Li M. Methodological comparison of observation and colonization measurement of arbuscular mycorrhizal fungi [J]. Mycosistema, 2011, 30(4): 519-525.
- [18] 谢 岷, 邓 澜, 雷晓光, 等. 干旱胁迫下丛枝菌根真菌对草莓根系生长的影响 [J]. 安徽农业科学, 2017, 45(19): 10-12.
- Xie M, Deng Y, Lei X G, et al. Effects of inoculating arbuscular mycorrhizal fungi on root growth of strawberry under drought stress [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2017, 45(19): 10-12.
- [19] 杨 霞, 李毅博, 白月梅, 等. 干旱条件下叶片非顺序衰老小麦顶二叶叶绿素荧光特性 [J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(1): 173-179.
- Yang X, Li Y B, Bai Y M, et al. Chlorophyll fluorescence characteristics of top two leaves in non-sequential senescence wheat under drought condition [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2016, 34(1): 173-179.
- [20] 韩 冰, 郭世荣, 贺超兴, 等. 丛枝菌根真菌对盐胁迫下黄瓜植株生长、果实产量和品质的影响 [J]. 应用生态学报, 2012, 23(1): 154-158.
- Han B, Guo S R, He C X, et al. Effects of arbuscular mycorrhiza fungi (AMF) on the plant growth, fruit yield, and fruit quality of cucumber under salt stress [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(1): 154-158.
- [21] Josefa M N, Olaya P T, Asunción M. Alleviation of salt stress in citrus seedlings inoculated with arbuscular mycorrhizal fungi depends on the rootstock salt tolerance science direct [J]. Journal of Plant Physiology, 2014, 171(1): 76-85.
- [22] 张欣磊, 邱雅静, 王艳红, 等. AM 真菌对盐胁迫下白芨生长和养分吸收的影响 [J]. 生态科学, 2020, 39(5): 1-8.
- Zhang X L, Qiu Y J, Wang Y H, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on growth and nutrient acquisition of *Bletilla striata* under salt stress [J]. Ecological Science, 2020, 39(5): 1-8.
- [23] Shin Y K, Bhandari S R, Cho M C, et al. Evaluation of chlorophyll fluorescence parameters and proline content in tomato seedlings grown under different salt stress conditions [J]. Horticulture, Environment and Biotechnology, 2020, 61(10): 433-443.
- [24] Dai Y, Shao M, Hannaway D, et al. Effect of *Thrips tabaci* on anatomical features, photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence of *Hypericum sampsonii* leaves [J]. Crop Protect, 2009, 28(4): 327-332.

- [25] Maxwell K,Johnson G N. Chlorophyll fluorescence: a practical guide [J]. Journal of Experimental Botany, 2000, 51(345):659-668.
- [26] 唐 玲,李倩中,荣立萍,等.盐胁迫对鸡爪槭幼苗生长及其叶绿素荧光参数的影响 [J].西北植物学报,2015,35(10):2050-2055.
Tang L,Li Q Z,Rong L P,et al. Effects of salt stress on the growth and leaf chlorophyll fluorescence in *Acer palmatum* seedlings [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica,2015,35(10):2050-2055.
- [27] 高 崇.接种AM真菌对盐胁迫下杜梨实生苗生长及耐盐性的影响研究 [D].重庆:西南大学,2013.
Gao C. Effects of AM fungi inoculation on growth and salt tolerance of *Pyrus pyrifolia* seedlings under salt stress [D].
- [28] 杨海霞,李士美,李 敏,等.丛枝菌根真菌对白三叶耐盐性的影响 [J].青岛农业大学学报(自然科学版),2014,31(2):85-90.
Yang H X,Li S M,Li M,et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on salinity tolerance of *Trifolium repens* L. [J]. Journal of Qingdao Agricultural University (Nat Sci Ed),2014,31(2):85-90.
- [29] 王 栋,高 军,艾 瑕,等.丛枝菌根真菌对紫花苜蓿幼苗生长及生理特性的影响 [J].塔里木大学学报,2020,32(2):55-62.
Wang D,Gao J,Ai Q,et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on growth and physiological characteristics of alfalfa seedlings [J]. Journal of Tarim University,2020,32(2):55-62.

(上接第 57 页)

- [18] 国家烟草专卖局.烟草及烟草制品多酚类化合物绿原酸、芸香苷和莨菪亭的测定:YC/T 202—2006 [S].北京:中国标准出版社,2006.
State Tobacco Monopoly Administration. Determination of polyphenolic compounds chlorogenic acid,rutin and scopoletin in tobacco and tobacco products: YC/T 202—2006 [S]. Beijing: China Standard Press,2006.
- [19] 国家烟草专卖局.烟草及烟草制品水溶性糖的测定:YC/T 159—2002 [S].北京:国家烟草专卖局,2002.
State Tobacco Monopoly Administration. Determination of water-soluble sugar in tobacco and tobacco products: YC/T 159—2002 [S]. Beijing: China standard Press,2002.
- [20] 国家烟草专卖局.烟草及烟草制品总氮的测定:YC/T 161—2002 [S].北京:国家烟草专卖局,2002.
State Tobacco Monopoly Administration. Determination of total nitrogen in tobacco and tobacco products: YC/T 161—2002 [S]. Beijing: China Standard Press,2002.
- [21] 国家烟草专卖局.烟草及烟草制品蛋白质的测定:YC/T 216—2002 [S].北京:国家烟草专卖局,2002.
State Tobacco Monopoly Administration. Tobacco and tobacco products protein: YC/T 216—2002 [S]. Beijing: China Standard Press,2002.
- [22] 霍开玲.烤烟成熟和调制期间颜色参数变化及烤前晾制对其质量的影响 [D].郑州:河南农业大学,2011.
Huo K L. Changes in color parameters of flue-cured tobacco during maturation and conditioning and the effect of air-curing before curing on its quality [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University,2011.
- [23] 韩富根.烟草化学 [M].北京:中国农业出版社,2010.
Han F G. Tobacco chemistry [M]. Beijing: China Agriculture Press,2010.
- [24] 郭文龙,丁松爽,刘路路,等.翻堆对初次发酵过程中雪茄茄芯烟叶质量变化的影响 [J].南方农业学报,2021,52(2):365-373.
Guo W L,Ding S S,Liu L L,et al. Effect of pile turning on the quality change of cigar core tobacco leaf during primary fermentation [J]. Journal of Southern Agricultural,2021,52(2):365-373.
- [25] 梁太波,张艳玲,尹启生,等.山东烤烟烟叶颜色量化分析及与多酚和类胡萝卜素含量的关系 [J].烟草科技,2012(4):67-71.
Liang T B,Zhang Y L,Yin Q S,et al. Quantification analysis of leaf color of flue-cured tobacco from Shandong and its relationship with polyphenol and carotenoid contents [J]. Tobacco Science & Technology,2012(4):67-71.
- [26] 王荣浩,李林林,陈 栋,等.美拉德反应在烟草加工中的应用研究进展 [J].食品工业科技,2019,40(30):345-350,356.
Wang R H,Li L L,Chen D,et al. Research progress on application of maillard reaction in tobacco production and processing [J]. Science and Technology of Food Industry,2019,40(30):345-350,356.